

イメージベース FIT による超音波伝搬解析と 超音波映像化への応用

Simulation of Ultrasonic Wave Propagation with the Image-based FIT
and its Application to Ultrasonic Imagings

愛媛大学大学院 中畑和之

概要

近年の超音波探傷ニーズの多様化・複雑化に伴い、超音波伝搬のシミュレーションも高度な技術が求められている。ここでは、対象とすべき被検体の断面写真データ、CT データ、CAD データから数値モデルを作成し、それを基に数値解析を行うイメージベース処理を示す。要素技術として有限積分法 (FIT) を採用しており、プリプロセスを効率化しているため、非均質で音響異方性を有する材料を容易にモデル化でき、固体-液体-気体に対する結合解析も可能である。ここでは、金属やコンクリート等を対象として、接触探傷法、非接触探傷法のモデリングを示す。また、コンクリートの内部きずの映像化を本シミュレータを用いて数値実験した事例を示す。

1. 緒言

シミュレーションを積極的に工学問題に取り入れようとする動きは活発であり、非破壊検査の分野も例外ではない。超音波伝搬シミュレーションの役割は、事前に超音波の伝搬経路を予測しておくことだったり、あるいは検査結果に理論的な意味づけをするためであったりと様々である。しかし、近年の複雑化する検査対象に対してシミュレーションを行う上で障害となるのが、数値モデルの作成である。筆者らは、対象とする被検体の写真等の画像データを読み込み、これをそのまま数値解析に入力することで、非均質材料や複雑形状を容易にモデル化できるイメージベース波動解析を提案している [1]。要素技術は有限積分法 [2](FIT: Finite Integration Technique) である。FIT は波動方程式を空間領域と時間領域で離散化し、時間ステップごとに波動場を計算する手法であり、液体-固体-気体中の超音波の伝搬を連成して解析することが可能である。ここでは、弾性波動場に対する EFIT と音響波動場に対する AFIT を示し、これらを結合することによって、接触探傷法、非接触探傷法のモデリング例を示す。本技術を積極的に応用すれば、非破壊検査の効率化あるいは検査精度の向上につながることを期待できる。その一例として、本稿ではコンクリート中のボイド映像化のシミュレーションを行った事例について述べる。

2. 3次元有限積分法 (3D-FIT)

2.1 固体中の波動場に対する EFIT

弾性波動場に対する FIT は、動弾性有限積分法 (EFIT[2]) と呼ばれている。支配方程式は3次元座標系 (x_1, x_2, x_3) で記述される。ここで、固体は一般異方性 (等方性含む) であるとする。以下ではインデックス表記とし、総和規約を適用する。 x_i 方向の粒子速度を v_i 、応力を τ_{ij} とおいたとき、3次元波動場を支配する運動方程式および構成則は以下ようになる。

$$\rho(\mathbf{x})\dot{v}_i(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial \tau_{ij}(\mathbf{x}, t)}{\partial x_j} + f_i(\mathbf{x}, t) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$\dot{\tau}_{kl}(\mathbf{x}, t) = c_{klj} \frac{\partial v_i(\mathbf{x}, t)}{\partial x_j} \quad (k, l = 1, 2, 3) \quad (2)$$

ここで、 $(\dot{})$ は時間 t に関する偏微分 ($\partial/\partial t$)、 ρ は密度、 f_i は材料に作用する物体力、 $c_{kl ij}$ は弾性スティフネスである。

EFIT の定式化からは逸れるが、異方性材料には波の位相面の移動速度である位相速度と、エネルギーの伝搬速度である群速度の 2 種類が存在する。なお、等方性材料中ではこれらの方向・速度は一致する。位相速度を解析的に求めるためには、以下の Christoffel 固有方程式 [3] を解けばよい。

$$(\Gamma_{ij} - \rho v^2 \delta_{ij}) d_i = 0 \quad (3)$$

ここで、 d_i は偏向ベクトル、 v は位相速度であり、 Γ_{ij} は位相の進行方向 l_k と c_{ijkl} からなるマトリクスである。この方程式から求められる 3 つの固有値 v が、1 つの P 波と 2 つの S 波の位相速度に対応する。また、次式によって x_i 方向の群速度 g_i を求めることができる。

$$g_i = \frac{1}{\rho v} c_{ijkl} d_i d_l l_k \quad (4)$$

上式で解析的に得られる群速度分布は、EFIT による数値計算でも求められる。この詳細については、著者の前論文 [4] を参照されたい。

本題に戻すが、EFIT は次式のように応力と粒子速度を交互に計算しながら解を求める方法である。

$$\{v_i\}^z = \{v_i\}^{z-1} + \Delta t \{\dot{v}_i\}^{z-\frac{1}{2}}, \quad \{\tau_{ij}\}^{z+\frac{1}{2}} = \{\tau_{ij}\}^{z-\frac{1}{2}} + \Delta t \{\dot{\tau}_{ij}\}^z \quad (5)$$

ここで、 Δt は時間間隔であり、上付き文字 z は整数次または半整数次の時間ステップを示している。EFIT は陽的解法であるため、CFL 条件を満たすように Δt を決定する必要がある。

2.2 流体・気体中の波動場に対する AFIT

流体・気体に対する FIT は、音響有限積分法 (AFIT[2]) と呼ばれている。流体・気体中では超音波は P 波として伝搬する。ここでは、超音波が伝搬する媒質は圧縮性理想流体であるとする。運動方程式は式 (1) と同じであるが、構成則が異なる。

$$\dot{\tau}_{ij}(\mathbf{x}, t) = \lambda(\mathbf{x}) \frac{\partial v_k(\mathbf{x})}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (6)$$

上式で δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。流体中の音速を c_f とすると、 $\lambda = \rho c_f^2$ の関係がある。なお、圧力と応力との関係は $p = -\tau_{ii}$ となる。AFIT も、式 (5) のように応力 (圧力) と粒子速度を交互に計算しながら陽的に解を求める。

2.3 結合解法のための境界条件設定

EFIT は固体中 (弾性波動場) を、AFIT は流体中 (音響波動場) を伝搬する超音波を扱うことができる。これらを結合して用いるために、流体 {f} と固体 {s} が接触している界面において適切な境界条件の設定が必要となる。満足すべき条件は、

- 粒子速度が連続 ($v_i^{\{f\}} = v_i^{\{s\}}$)
- 垂直応力が連続 ($\tau_{ii}^{\{f\}} = \tau_{ii}^{\{s\}}$ No sum for i)

である。FIT のセル配置では、垂直応力のセルは界面上に配置されていないため、界面における垂直応力の連続性は厳密には保証されないが、隣り合うセル長を小さくすることによって暗に満足される。

3. イメージベースモデリング

イメージベースモデリングとは、被検体の写真等のデジタル画像に画像処理を施し、解析モデルの入力データを作成する方法である。2 次元モデルでは、写真等をスキャナで読みとり、画像処理を施した後に BMP 画像に変換する [1]。2 次元イメージベースモデリングの流れを図 1 に示す。BMP 画像の 1 ピクセルと FIT の 1 セルを一致させることで、コンクリート中の骨材分布等が簡単に、かつ忠実にモデル化できる。本稿はモノクロ印刷であるので表現できないが、実際は 24bpp でエンコードされた RGB カラーモデルで表している。RGB 明度は、赤・緑・青の輝度を示す 3 つの 8 ビット符号無し整数 (0 から 255 まで) で表せるため、本シミュレータは最大 256^3 の異なる材料定数が設定できることになる。

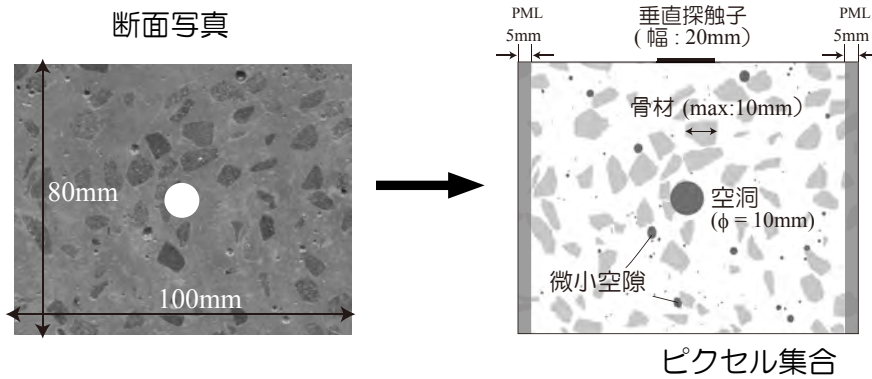


図1 コンクリートの2次元イメージモデリングとピクセルデータ (BMP)

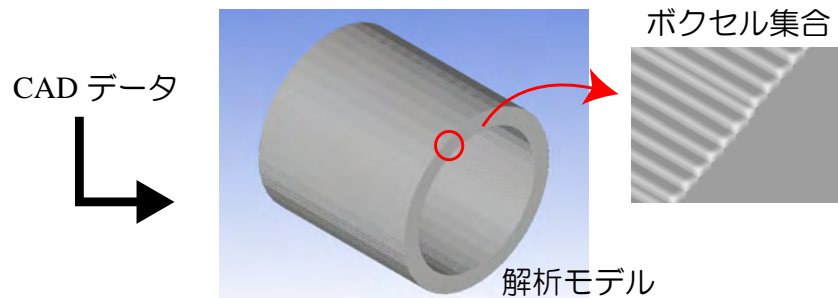


図2 円筒配管の3次元イメージモデリングとボクセルデータ

3次元モデルでは、X線CT画像やCADデータからボクセルデータを作成し、この1ボクセルとFITの1セルを一致させることで、複雑な外部形状を持つ対象でもロバストにデータを作成できる。3次元イメージベースモデリングの流れを図2に示す。FITではボクセル要素を用いているため、曲線部分が階段状にモデル化される。線形の波動問題では、波長に比べて十分に短いセル長を設定する[1]により、精度の良い解析が可能である。

4. 超音波伝搬シミュレーション

4.1 コンクリート探傷のモデリング

図1に示すような、幅100mm、高さ80mmのコンクリート断面を考える。断面写真を画像処理することによって、BMP画像を作成する。コンクリートはセメントペースト、骨材、気泡の3種類の媒質から構成されているものとし、それぞれ黒、青、緑のRGBカラーで表現している。全体積に対する骨材含有率は約30%、骨材の最大粒径は10mmであり、中心に直径 $\phi=10\text{mm}$ の円形空洞が存在している。セメントペーストのP波音速 $c_P=3950\text{m/s}$ 、S波音速 $c_S=2250\text{m/s}$ 、 $\rho=2050\text{kg/m}^3$ とし、骨材は $c_P=4400\text{m/s}$ 、 $c_S=2500\text{m/s}$ 、 $\rho=2600\text{kg/m}^3$ とした。上表面に設置した垂直探触子(幅20mm)から、中心周波数が200KHzのP波が送信されるものとする。セル長は $\Delta x=0.025\text{mm}$ と設定した。時間ステップ幅は、 $\Delta t=3\text{ns}$ とし、 $42\mu\text{s}$ (14,000ステップ)まで計算している。モデルの両端には幅5.0mmのPML(無反射境界)を設けている。EFITで計算された変位場 $|u|$ のスナップショットを図3に示す。図3[b]では、P波が空洞で散乱しており、同図[c]では空洞から散乱したS波がみられる。また同図[d]では、底面に到達したP波が反射しているが、同図[e]や[f]をみると反射波の波動が拡散してしまい波面が崩れている。従って、超音波がコンクリート中を伝搬すると、骨材や気泡による多重散乱の影響で波動が次第に拡散していき、介在物の疎密に依存して波面が局所的に変化していくことがわかる。

4.2 空気超音波法のモデリング

本シミュレータでは、写真だけでなくイラスト等からもモデルを作成することができる。ここでは空気超音波法をモデル化する。空気超音波法とは、探触子を被検体に接触させることなく空気を介

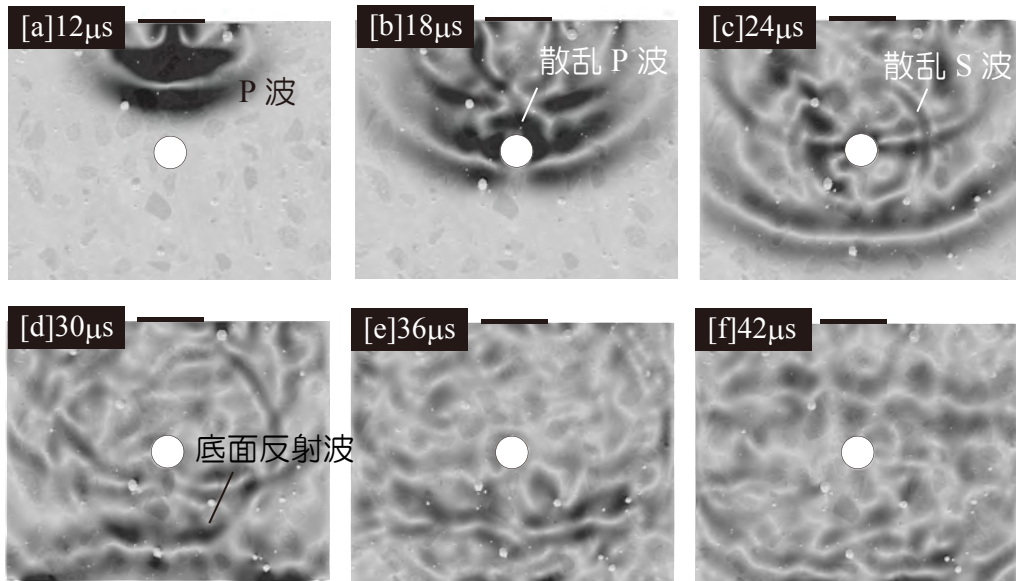


図3 コンクリート中を伝搬する超音波

して探傷を行う方法である．ここでは，図4に示すように，幅80mm，高さ20mmのステンレス鋼 ($c_P=5800\text{m/s}, c_S=3200\text{m/s}, \rho=7800\text{kg/m}^3$) の中心に直径 $\phi=5\text{mm}$ の円形空洞を有するモデルに対して，空気中 ($c_f=330\text{m/s}, \rho=1.2\text{kg/m}^3$) からステンレス鋼へ超音波を送信する場合を考える．ここでは，鋼材中でP波の屈折角が 45° になるように非接触型探触子（幅10mm）から空気中に超音波を送信する．送信波の中心周波数は500KHzであり，セル長を $\Delta x=0.01\text{mm}$ とした．また，時間ステップ幅は $\Delta t=1\text{ns}$ と設定し， $30\mu\text{s}$ （30,000ステップ）まで計算している．なお，解析領域の四辺に幅4.0mmのPMLを設けている．

イメージベースEFIT・AFITで計算された変位場 $|u|$ のスナップショットを図4に示す．空気と鋼材の音響インピーダンスが大きく異なるため，鋼材中に屈折する超音波の振幅はかなり小さい．そのため，波動伝搬が観察しやすいように，鋼材中の変位を一律に定数倍して出力している．超音波が空

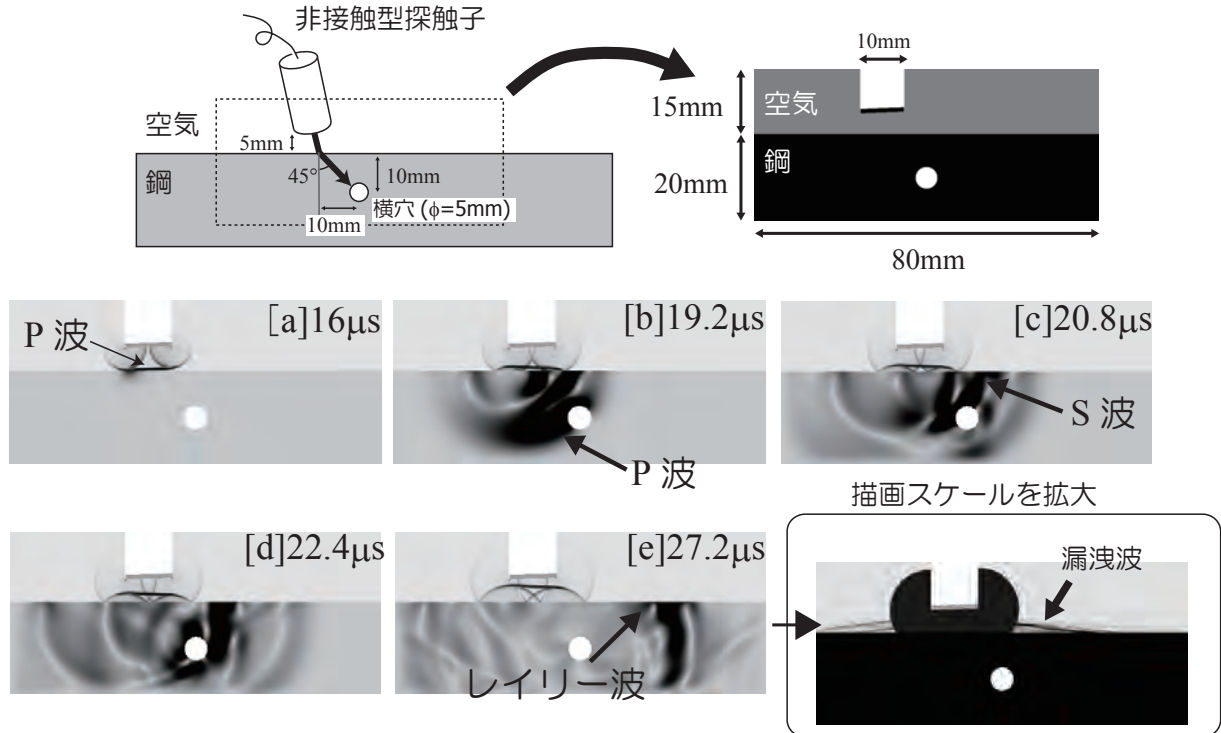


図4 非接触探触子を用いた空気超音波法のモデル化

気中から鋼に入射すると、図4[b]に示すように、P波が発生していることがわかる。同図[d]では、S波が空洞に到達しているのがわかる。同図[e]では、鋼材上側の界面に沿って伝搬する振幅の大きなレイリー波が見られる。同図[e]では、鋼材上側の界面から空気中へ漏洩超音波も観察できる。これは、非常に振幅が小さいため、描画スケールを調整することによって観察できる。

4.3 複雑形状を有する金属に対する超音波探傷のモデリング

図5の上部に示すような発電プラントに用いられるタービン部材を考える。タービンの材質はステンレス鋼とした、モデル側面に探触子(10mm×20mm)を設置し、中心周波数500KHzのパルスを送る。解析条件は $\Delta x = 0.125\text{mm}$ 、 $\Delta t = 0.005\mu\text{s}$ とした。図5に3D-EFITによって得られた速度場 $|v|$ の等値面を表示したものを示す。10 μs 後のスナップショットではP波が発生している様子が見られ、20 μs 後のスナップショットではS波が発生している様子が見られる。なお、10000ステップまで(50 μs まで)計算した場合の計算時間は2ノードのプロセス並列計算(ノードあたり16CPUスレッド並列計算)を用いて約8時間程である。

5. コンクリートの超音波映像化

シミュレーションの大きなメリットは、コンピュータ上で仮想的な実験をすることで、予算や環境等の制約で実験できない場合に、大凡の予測や評価ができることである。ここでは、シミュレーションの活用例として、コンクリートのアレイ探傷による映像化を挙げよう。コンクリート被検体は金属に比べてマスが大きいこと、コンクリート用の低周波探触子のアレイ化はコストが高くなることから、実際に被検体を作成して計測実験を行うには相当の準備が必要である。しかし、シミュレーションによってコンクリートのアレイ探傷をモデル化することは至極容易である。コンクリート探傷では、これまで反射法や透過法が用いられているが、アレイ探触子を用いた例はほとんど無い。図6に、映像化の対象となるコンクリートの概要を示す。コンクリートの組成は、セメントペースト、骨材、気泡とし、コンクリートの内部に直径20mmのポイドが存在するものとする。コンクリートの上部に、16個のアレイ探触子を設置し、この探触子から中心周波数200KHzの超音波を送受信されるものとする。図6の右側に、EFITを用いて数値的に得られたエコーを示す。探触子No.8から超音波を送信し、No.4,8,12,16の4位置で受信した波形を示している。この図から分かるように、ポイドからの反射エコーは微弱である。

個々の探触子で得られるポイドからのエコー高さは小さいが、これらを重ね合わせることでポイド

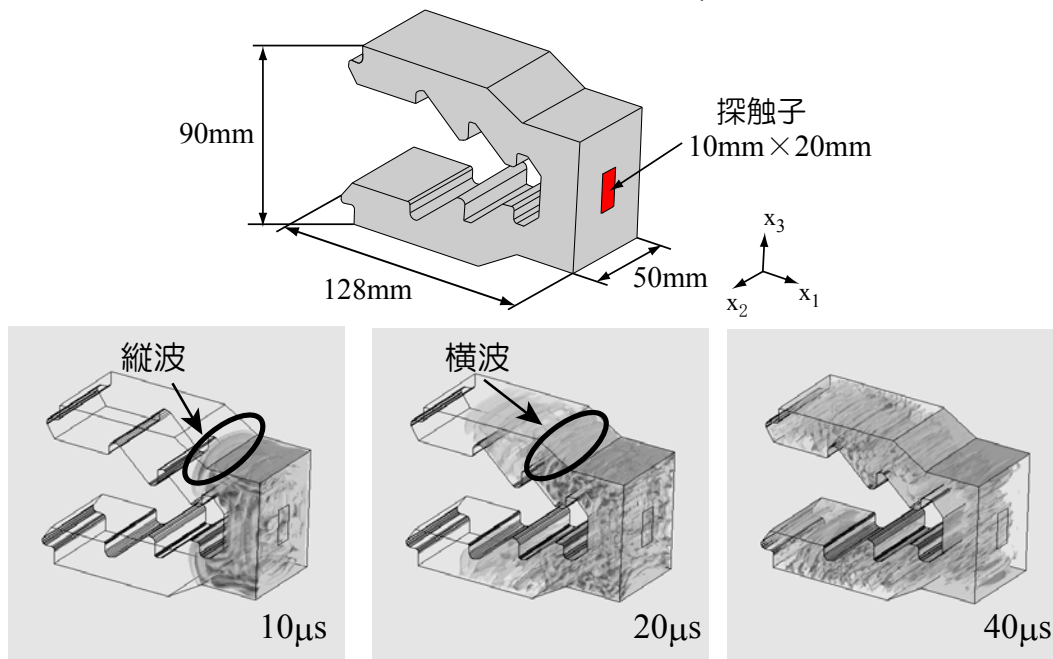


図5 タービン部材を伝搬する超音波の3次元表示

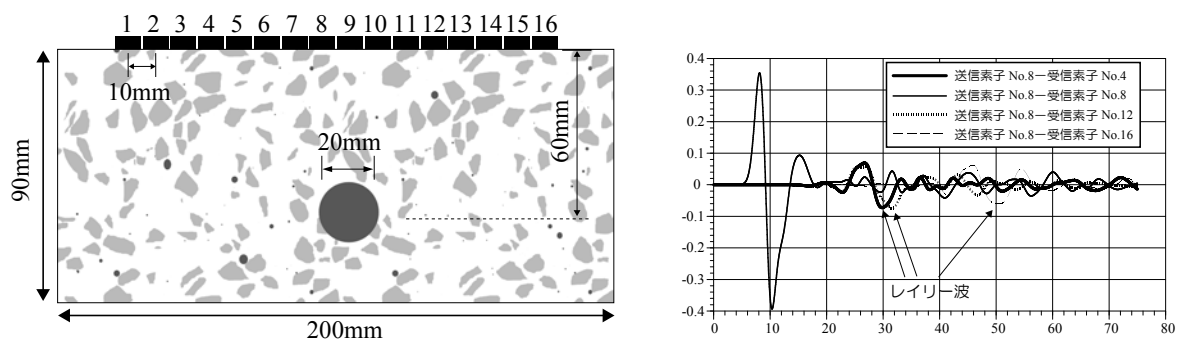


図6 コンクリートに対する超音波アレイ探傷のモデリング

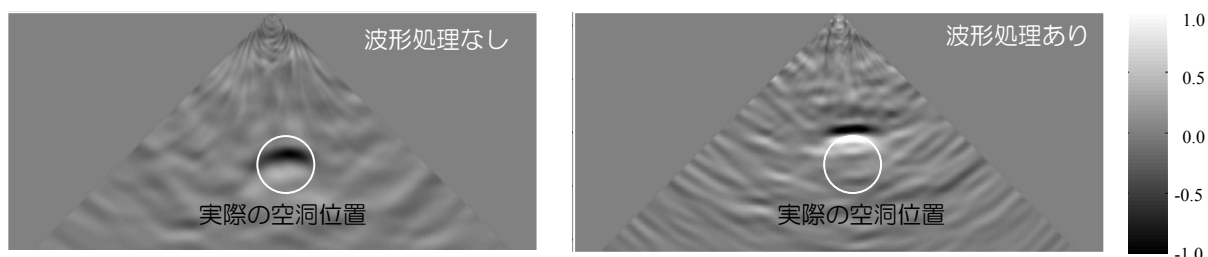


図7 FSAP方式によるコンクリート中のポイドの映像化

を映像化することを試みる．ここでは，全波形サンプリング (FSAP) 方式 [5] を用いて，ポイドの映像化を行う．FSAP は，振動素子のすべての組み合わせで得られる波形を保存しておいて，後の処理で波形を合成し，欠陥像を作成する方法である．シミュレーションによるコンクリート中のポイドの映像化結果を図7に示す．図7の左側は原波形を重ね合わせたもの，右側は波形処理および波形マトリクスに操作を施して映像化したものである．波形処理なし (図7左) の場合でも，ポイドの位置が大凡把握できることが分かる．波形処理を導入する (図7右) と，空洞の位置が正確に再構成されているのがわかる．これらの結果から，コンクリート探傷にアレイ探触子を導入することで，検査精度の向上が期待できそうである．

6. 結 言

本稿では，対象とする被検体の写真等の画像データを読み込み，これをそのまま数値解析に入力することで，非均質材料や複雑形状を容易にモデル化できるイメージベース波動解析について示した．また，本シミュレータを活用した事例として，コンクリートの超音波アレイ映像化の可能性について述べた．頁数の関係で，異材溶接部等の異方性材料や繊維補強された複合材料 (FRP 等) のシミュレーションは記載できなかったが，当日の部門会の発表で紹介したいと考えている．

参考文献

- [1] 中畑和之，徳永淳一，廣瀬壯一: イメージベース波動伝搬シミュレーションと超音波探傷法のモデル化への応用，非破壊検査，Vol.59, No.5, 2010，掲載決定，印刷中
- [2] R. Marklein: *Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik*, Shaker Verlag, Aachen, 1998 (in German)
- [3] B.A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, Volume 1, John Wiley & Sons, New York, 1973.
- [4] 中畑和之，廣瀬壯一: 非均質異方性材料中の弾性波伝搬解析のためのイメージベース EFIT の開発と非破壊検査への応用，応用力学論文集，Vol.12, pp.163-170, 2009.
- [5] 中畑和之，平田正憲，廣瀬壯一: 全波形サンプリング処理方式を利用した散乱振幅からの欠陥再構成，非破壊検査，Vol.59, No.6, 2010，掲載決定，印刷中